

LIGHT REFLECTING METHOD USING ACOUSTOOPTICAL MODULATION AND APPARATUS THEREFOR

Patent number: JP3175340
Publication date: 1991-07-30
Inventor: POLLAK FRED H; SHEN HONG-EN
Applicant: POLLAK FRED H;; SHEN HONG-EN
Classification:
- International: G01N21/27; H01L21/66
- european:
Application number: JP19900240185 19900912
Priority number(s):

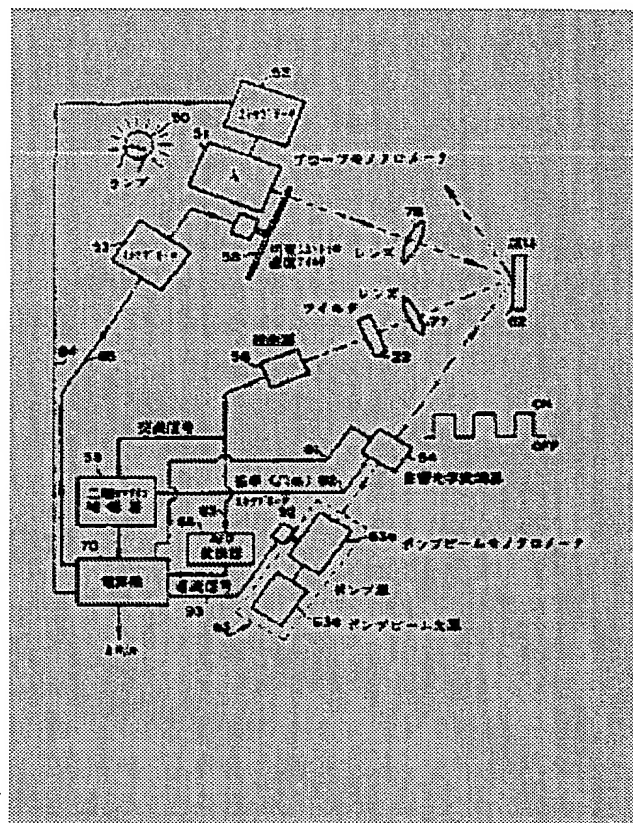
Also published as:

EP0417551 (A)
US5255071 (A)
EP0417551 (A)

Abstract of JP3175340

PURPOSE: To improve the measurement of the characteristics of a material based on light reflectivity by directing probe beam of monochromatic light and acoustooptically modulated pump beam to a sample.

CONSTITUTION: The probe light of a light source 50 passes through the monochromator 51 driven by the stepping motor 52 to be condensed to a sample 62 to become a variable wavelength λ and the pump beam of a light source 63 becomes a variable wavelength λ_p by a stepping motor 92 and a monochromator 62 and receives the modulation of frequency Ω_m by an acoustooptical modulator 54 to direct the sample 62. The beam reflected from the sample 62 is condensed to a detector 56 to become a DC signal and an AC signal and the AC signal is applied to a two-phase lock-in amplifier 55 and a DC analogue signal is subjected to A/D conversion 66 to be inputted to a computer 70. The computer 70 has function performing control, data collection, the analysis of data containing a light reflecting spectrum and the comparison of the related parameter obtained by the analysis of the data and a logical model and evaluates the characteristics of the heterostructure of a semiconductor and changes the wavelength of pump beam and modulation frequency to measure the interfacial characteristics of a component layer.



Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

BEST AVAILABLE COPY

⑩ 日本国特許庁(JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A) 平3-175340

⑬ Int. Cl.⁵

識別記号

庁内整理番号

⑭ 公開 平成3年(1991)7月30日

G 01 N 21/27
H 01 L 21/66

B 7458-2G
L 7013-5F

審査請求 未請求 請求項の数 10 (全13頁)

⑮ 発明の名称 音響光学変調を用いた光反射法とその装置

⑯ 特 願 平2-240185

⑰ 出 願 平2(1990)9月12日

優先権主張 ⑱1989年9月13日 ⑲米国(U S) ⑳406,726

⑳ 発 明 者 フレッド・エイチ・ボラーク アメリカ合衆国、ニュー・ヨーク州、ニュー・ヨーク、メイン・ストリート、531

㉑ 出 願 人 フレッド・エイチ・ボラーク アメリカ合衆国、ニュー・ヨーク州、ニュー・ヨーク、メイン・ストリート、531

㉒ 出 願 人 ホン・エン・シエン アメリカ合衆国、ニュー・ジャージー州、イートン タウン、カウンティ・クラブ・ロード、7 アpartment、29

㉓ 代 理 人 弁理士 江崎 光好 外3名
最終頁に続く

明 細 書

1. 発明の名称

音響光学変調を用いた光反射法とその装置

2. 特許請求の範囲

1. 単色光源手段、単色光を検査する試料に指向させる手段、エネルギー・ビームを変調する音響光学変調手段を含み、前記エネルギー・ビームを試料に指向させるポンプビーム手段、吸収されない単色光と吸収されない変調されたビームの少なくとも一部を試料から出力に直流信号と交流信号を発生させる検出器手段に指向させる手段、検出器手段からの直流信号を電算機手段の入力端に輸入する手段、検出器手段から交流信号を入力端で受信し、その出力端で電算機手段に接続されたロックイン増幅器、および試料に入射する単色光の光強度を可変する可変手段と電算機手段からの出力によって前記可変手段を制御し直流信号を実質上一定に維持する駆動手段とを含み、一定の実験で動作条件をほぼ一定に維持する制御手段から成る、光反射によって

材料の特性を決定する装置。

2. 更に、前記電算機手段から前記音響光学変調手段の変調周波数を制御する手段から成る請求項1記載の装置。

3. 前記可変手段は可変ニュートラル密度フィルターを保有し、前記駆動手段は一定の直流信号に要求される光強度を越えるまで所定の多重過程でステップモータを急激に駆動させ、その後要求される光強度の近似値に達するまで反対方向に順次駆動するように電算機手段の対応する電算機出力端から制御されるステップモータを保有する請求項1又は2記載の装置。

4. 更に、前記電算機手段によってポンプビームの波長を変化させる手段と、電算機手段で制御され、単色光の波長を可変するステップモータを含み、前記電算機手段によって前記光源手段からの単色光の波長を可変する手段とから成る請求項1～3の何れか1項に記載の装置。

5. 直流信号を検出器手段から電算機手段の入力端に輸入させる手段はA/D変換器を保有し、

また、ロックイン増幅器はその入力端で検出器からの交流信号を受信し、その出力端で電算機手段の他の入力端に接続された二相ロックイン増幅器である請求項1～4の何れか1項に記載の装置。

6. 前記電算機手段は、電界分布とトラップ回数に関する情報を得るため、同相信号のポンプ変調周波数依存性を定めるために動作する請求項1～5の何れか1項に記載の装置。

7. 下記過程、

- a) 特性を調べるべき材料試料の上に単色光のプローブビームを指向させ、
- b) 比較的短い時定数でトラップ状態に関する情報を得るため、音響光学的に変調されたポンプ光源からのポンプビームを試料上に指向させて試料を電子変調させ、
- c) 試料から反射された、あるいは試料を通過した光を、直流信号と交流信号を発生させる検出器に捕集し、
- d) トラップ回数に関する情報を得るため、同

同相信号のポンプ変調周波数依存性を決定する過程から成る請求項9記載の方法。

3. 発明の詳細な説明

〔産業上の利用分野〕

この発明は、光の反射率を用いて物質、特に半導体、半導体のヘテロ組織及び半導体の界面の特性を測定する方法とこの方向を実行する装置に関する。

〔従来の技術〕

半導体（バルク又は薄膜の半導体）、半導体のヘテロ組織（超格子、量子井戸、ヘテロ接合部）及び半導体の界面（ショットキーバリア、金属絶縁物半導体、半導体の電解液、半導体の真空等）を研究し、特徴付けける重要性は、特にこれ等の半導体の多が、また半導体の微細構造が分子線エビタキシー成長法（MBE）、金属有機物の化学気相付着法（MOCVD）等の様な最近の薄膜技術によって作製されるので、ますます重要になっている。

MBEやMOCVDあるいは他の方法で成長さ

相光反射信号のポンプ変調周波数依存性を決める、

特に、半導体と半導体ヘテロ組織の界面でのトラップ回数に関する情報を得る方法。

8. 更に、過程 d) から多重トラップ状態に関する情報を得る過程から成る請求項7記載の方法。

9. 下記過程、

- a) 単色光のプローブビームを材料試料上に指向させ、
- b) ポンプ光源からのポンプビームを試料上に指向させてこの試料を電子変調し、
- c) 直流信号と交流信号を発生させる検出器中に、試料から反射した、あるいは試料を通過した光を捕集し、
- d) ポンプビームの波長とその変調周波数を可変する、

から成り、成分層の特定とその品質に関する情報と、半導体及び半導体ヘテロ組織の各界面の特性に関する情報を得る方法。

10. 更に、トラップ回数に関する情報を得るため、

せた材料と界面は、フォトルミネッセンス、フォトルミネッセンスの励起分光、フォトルミネッセンスの吸収分光、変調分光、ラマン及び共鳴ラマン散乱、サイクロトロン共鳴、ホール効果、透過電子顕微鏡等を含めた種々の光学、電子及び組織方法によって特徴付けされる。これ等の道具の各々は、対象物質に関する特異な情報を提供する。特徴評価のためには、実験器具はできる限り簡単で、情報に富むべきである。上記の方法の多くのものは、特殊なもので、採用するのに往々困難である。その単純さと立証されている有用性のため、光の反射率は近年半導体の薄膜とヘテロ組織を評価するのに重要性を得ている。

ある種のパラメータに関する誘導体を評価する変調分光では、興味のないバックグラウンドは半導体と半導体の微細組織のエネルギー・レベルの間の特異な変位に相当するシャープなスペクトル線のために消去される。同様に、絶対スペクトル中に見られない微弱な特性が強調される。反射率（又は透過率）の全スペクトルを計算することは困難

であるが、変調分光の局在化されたなスペクトル状況のライン形状を説明することができる。ライン形状を合わせることができることは、変調分光の重要な利点である。ライン形状は、発生した半導体のエネルギー・ギャップや、バンドの広がりパラメータの正確な値を合わせることである。更に、「外部」変調分光は変調パラメータに対する系の交流応答であるので、光の反射率は、位相、変調周波数、変調振幅、変調波長のような他の変調変数に情報を与える。

光の反射率では、材料に組み込んだ電界は、波長 λ のポンプビームによって形成される電子・空孔対の光注入によって変調される。このポンプビームは周期 Ω で切り出される。実験によれば、光反射率はトラップ中の電荷と少量のイオンとの再結合による組込電場の変調のためであることが示されている。こうして、光の反射率の信号の Ω 依存性を測定することによって、光の反射率を用いてトラップの回数に関する情報を得ることができる。

Ω を100 kHzの値まで可変し、成分層、その品質及び種々の界面の特性を特定できることが発見されている。

この発明は、材料の特定に関する改善された結果を達成し、調べる材料の特性に関する付加的な情報をより高い精度と信頼性をもって得るため、従来の装置を改善することに関する。

(発明の課題)

それ故、この発明の課題は、従来の技術の装置およびこの装置を使用する方法に見られる難点を簡単に排除する、光の反射率で物質の特性を測定する改善された方法とその装置を提供することにある。

この発明の他の課題は、半絶縁された基板とドーピングされていない緩衝層、及びそれ等の間の界面状態の特性の判定ができる改良された装置に向けである。

この発明の他の課題は、例えばエンハンスモードでMESFETおよびHEMTデバイスに見られるような導電性または半絶縁性組織の特性を評価する

光の反射率、つまり電子変調の無接触形は波動体組織の界面の電場分布を研究するのに強力な手段であると知れている。光の反射率法では、材料中の電場が、周波数 Ω で切り出されたポンプビームによって電子・空孔対の光を注入して変調される。既に示されているが、光反射法は電子反射率の発生強度、つまり厚膜半導体又は薄膜半導体のバンド内遷移の領域での誘導スペクトルの形態である。光反射率は変調電場に対する形の交流応答であるから、変調周波数 $\langle\Omega\rangle$ 、ポンプビーム波長 $\langle\lambda\rangle$ 、ポンプビーム強度 $\langle I\rangle$ 等のような他の変調パラメータで重要な情報がある。

この特許出願、「光反射法によって物質の特性を判定する方法と装置」(この発明の対象はこの明細書では引用として引き合いに出す)に協願の明細書に開示されたいような光反射装置では、機械的なチョッパーを使用してポンプビームを変調している。しかしながら、変調周波数 Ω は約4,000 Hzに制限される。ここでは、音響光学変調器を用いてポンプビームの波長 λ と変調周波数

ために光の反射率を利用する装置にある。

この発明の他の課題は、エピタキシ成長した表面および界面のその場評価に使用できる装置にある。

この発明の他の課題は、使用が容易で、操作に信頼性があり、この方法を用いて得られた結果の精度が正確である、半導体材料及び半導体ヘテロ組織のようなある種の材料の特性を判定する方法にある。

更に、この発明の他の課題は、従来の技術に見られる不足や欠点を解消する、半導体材料のような物質を作製するのに連続的なその場監視を可能にする、光の反射率に基づいた方法にある。

この発明の他の課題は、半導体材料を製造するのに正確な品質管理を可能にする、光の反射率に基づく方法にある。

(課題を解決する手段)

上記の課題は、この発明により、光反射によって材料の特性を決定する装置の場合、単色光源手段、単色光を検査する試料に指向させる手段、エ

エネルギー・ビームを変調する音響光学変調手段を含み、前記エネルギー・ビームを試料に指向させるポンプビーム手段、吸収されない単色光と吸収されない変調されたビームの少なくとも一部を試料から出力に直流信号と交流信号を発生させる検出器手段に指向させる手段、検出器手段からの直流信号を電算機手段の入力端に入力する手段、検出器手段から交流信号を入力端で受信し、その出力端で電算機手段に接続されたロックイン増幅器、および試料に入射する単色光の光強度を可変する可変手段と電算機手段からの出力によって前記可変手段を制御し直流信号を実質上一定に維持する駆動手段とを含み、一定の実験で動作条件をほぼ一定に維持する制御手段から成る装置によって解決されている。

上記の課題は、この発明により、特に半導体及び半導体ヘテロ組織の界面でのトラップ回数に関する情報を得る方法の場合、

- a) 特性を調べるべき材料試料の上に単色光のプロープビームを指向させ、

を捕集し、

- d) ポンプビームの波長とその変調周波数を可変する、

過程から成る方法によって解決されている。

他の有利な構成は、従属請求項に記載されている。

(実施例)

この発明の上記課題と他の課題、特徴及び利点は、添付した図面に関連する説明からより明確になる。これ等の図面は、説明のためにのみあり、この発明による具体例を示すものである。

ここで、図面、特に第1図を参照すると、適当な光源50の光は、以下でプロープ・モノクロメータと呼ぶ、モノクロメータ51を通過する。波長 λ でのモノクロメータ11の出射強度は、通常のレンズ又はミラー(図示せず)によって試料62の上に集束する。 $I_0(\lambda)$ は、この場合、試料62を照射するプロープの光源50、51からの光の強度11である。試料62の電子変調はポンプ光源63からのポンプビームによって形成

- b) 比較的短い時定数でトラップ状態に関する情報を得るため、音響光学的に変調されたポンプ光源からのポンプビームを試料上に指向させて試料を電子変調させ、

- c) 試料から反射された、あるいは試料を通過した光を、直流信号と交流信号を発生させる検出器に捕集し、

- d) トラップ回数に関する情報を得るため、同相光反射信号のポンプ変調周波数依存性を決める、過程によって解決されている。

上記の課題は、この発明により、成分層の特定とその品質に関する情報と、半導体及び半導体ヘテロ組織の各界面の特性に関する情報を得る方法の場合、

- a) 単色光のプロープビームを材料試料上に指向させ、

- b) ポンプ光源からのポンプビームを試料上に指向させてこの試料を電子変調し、

- c) 直流信号と交流信号を発生させる検出器中に、試料から反射した、あるいは試料を通過した光

される電子・空孔対の光励起によって生じる。このポンプビームはレーザー光源か、あるいは好ましくは光源63aと第二モノクロメータ63bであって、これまで使用された機械的なチョッパーとは異なり、この発明により通常の構造の光学変調器54によって周波数 Ω で変調される。例えば Newport Electro Optics Systems, Inc. によって製造されているような音響光学変調器を用いると、変調周波数を5MHzまで許せる。試料62から反射したビームは、光電子倍增管、フォトダイオード、フォトコンダクター等のような検出器56上に集束する。検出器56の出力は二つの信号を含む。即ち、直流信号と交流信号である。第1図は光反射法の構造を示しているが、試料の背後に検出器を設置することによって、実験を容易に透過用に変更できる。従って、用語、光反射法(PR)をこの出願では、広い意味で反射法と透過法とに使用する。

プロープモノクロメータ51は、ステップモータ52によって駆動される。このモータは、何ら

かの通常の構成の参照符号70で一般的に指定され、以下に更に詳しく説明するような、種々の機能を達成するため通常の技術でプログラムされる電算機によって制御される。可変ニュートラル密度フィルター58もステップモータ53で駆動される。このモータも電算機70によって制御される。このようなステップモータを使用するとS/N比を10倍改善できることが見出されている。更に、電算機70も音響光学変調器54の周波数(Ω)を制御し、ポンプ光源63によって放出されたポンピングビームを変調する。前記ポンプ光源63はHe-Neレーザーであるか、あるいは好ましくはキセノン・アークランプと第二モノクロメータ63bのような光源63である。更に、ロックイン増幅器55は、(ポンプビームに対して)光反射信号の同相及び異相成分を決める公知構造の二相モデルである。二相ロックイン増幅器55を使用することは、以下に詳しく説明するように、トラップ状態に関する情報を得るため、光反射信号を Ω の関数として評価するのに大切で

は鏡(レンズ77で模式的に図示してある)によって検出器54上に指向される。フィルター22は試料62と検出器54の間の光通路に配設してある。検出器54の出力の交流信号は、二相ロックイン増幅器55の入力端に印加する。この増幅器には、導線82を介して変調器54からの基準信号(Ω)も印加し、後で説明する目的のため変調周波数 Ω に関する情報をもたらす。検出器54からの直流信号は導線83を経由して電算機70に入力する。この電算機はA/D変換器66を含み、検出器54からのアナログ信号を電算機70で使用するためデジタル信号に変換する。

電算機70の一つの出力は、使用者が使う表示部、即ち電算機に付属する表示画面(図示せず)に入力する所望の光反射信号 $\Delta R/R$ を含む。電算機70の他の出力は、ステップモータ52を制御し、導線84を介してプローブ光の波長 λ を変換する。電算機70の更に別な出力はステップモータ53を制御し、導線85を経由して可変ニュートラル密度フィルター58の調節を加減する。

ある。試料組織の異なった深さからの信号が異なった位相の信号と Ω 。依存性を形成し、これ等は二相ロックイン増幅器55と電算機制御された変調周波数 Ω 。によって分類されることも知られている。

第1図には、プローブモノクロメータ51に関連してランプ50によって発生したプローブ光は、ステップモータ53を調節してこのプローブ光の波長 λ を可変できるが、レンズまたは鏡(レンズ77で模式的に図示してある)を使用して試料63の上に指向される。波長 λ 。を第二モノクロメータ63bで可変できるポンプ光源63によって生じるポンプビームも、音響光学変調器54によって変調されたのち、試料62の上に指向される。この変調器の周波数 Ω 。は電算機70によって導線81を経由して可変できる。ポンプビームの波長 λ 。も、プローブ光の波長 λ を制御したのと同じ方法でステップモータ92を使用して、電算機70によって導線93を経由して制御できる。試料62から反射した(透過した)光は、レンズ又

電算機70の更に別な出力は導線81を介して変調器54の周波数 Ω 。を制御する。そして、電算機70の更に別な出力はポンプビームの波長 λ 。を制御する。これ等の目的は後で詳しく説明する。

検出器56に入射する光は、二つの信号を含んでいる。即ち、直流信号(あるいは平均値)は $\alpha(\lambda)I_0(\lambda)R(\lambda) [\alpha(\lambda)I_0(\lambda)R(\lambda)]$ によって与えられる。ここで、 $\alpha(\lambda)$ は集束レンズ(又はミラー)の光学応答で、 $R(\lambda) [T(\lambda)]$ は物質の直流反射率(透過率)である。他方、周波数 Ω 。での変調された値は、 $\alpha(\lambda)I_0(\lambda)\Delta R(\lambda) [\alpha(\lambda)I_0(\lambda)\Delta T(\lambda)]$ である。ここで、 $\Delta R(\lambda) [\Delta T(\lambda)]$ は変調された反射率(透過率)である。検出器56からの交流信号は、 $i_0 \propto I_0 \Delta R (I_0 \Delta T)$ に比例するが、ロックイン増幅器55によって測定される。検出器56からの交流信号と直流信号をそれぞれ V_{ac} と V_{dc} で表すことにする。

興味のある量 $\Delta R(\lambda)/R(\lambda) [\Delta T(\lambda)/T(\lambda)]$ を評価するためには、規格化処理を利用して興味

のない共通成分 $\propto I_0$ を消去する必要がある。第1図では、規格化は電算機70で駆動されるステップモータ53に接続された可変ニュートラル密度フィルター58を用いて行われる。この可変ニュートラル密度フィルター58は、プローブモノクロメータ51（あるいはダイレーザのような他のプローブ光源）と試料62の間の光通路に設置される。検出器56からの直流信号(V_{dc})はサーボ系16に供給され、この系は V_{dc} を一定に維持するため、可変ニュートラル密度フィルター58、従って $\alpha(\lambda)I_0(\lambda)$ を可変する電算機70にA/D変換器を介して供給される。この処置では、結局、実験の動作条件、即ち検出器の増幅度、装置の分解能等を一定に維持することになる。

光の反射率の実験で上に説明したように、種々の問題は、(a) ポンプ光源から拡散散乱した光と、(b) 検出器56に取り込まれたポンプ光によって発生したフォトルミネッセンスとによって生じる。後者の問題は特に低温で（半導体と半導体組織）及び超格子及び量子井戸に対して77 K

でも、また時折り室温でも厳しい。光の反射率の測定で主要な目標は、従って、変調光源から拡散散乱する光及び／又は強力なポンプ光によって発生したフォトルミネッセンスを消去することにある。これ等の両光は検出器56に到達し、ロックイン増幅器55に見せ掛けの信号を発生させる。第1図では検出器56の前にあるフィルター22がポンプ光源から拡散した光を低減することを助けている。

光検出器56の直流出力 V_{dc} は、

$$V_{dc} = \alpha(\lambda) I_0(\lambda) K(\lambda) A(\lambda) \quad (1)$$

で表わすことができる。ここで、 $K(\lambda)$ は（フィルターを使用していれば、その応答を含めた）検出器の応答であり、 $A(\lambda)$ はこの検出器の増幅度である。

光の反射率では、交流出力(V_{ac})は、

$$V_{ac} = \{ \alpha(\lambda) I_0(\lambda) K(\lambda) + \alpha(\lambda_{pp}) I_{pp}(\lambda_{pp}) K(\lambda_{pp}) \} A(\lambda) \quad (2)$$

ここで、 I_{pp} は散乱及び／又は光反射による見掛け上の信号の強度であり、 λ_{pp} はこの見掛け上の信号の波長である。

第1図の規格化処置では、量 V_{dc} は可変ニュートラル密度フィルター58によって $I_0(\lambda)$ 、つまり試料62上に入射する光強度を可変して、ある一定値Cに維持される。このような処置では、検出器56の増幅度は変化しなくて、 $A(\lambda) = A$ となる。ここでAは一定値である。従って、

$$\alpha(\lambda) I_0(\lambda) = C/R(\lambda) K(\lambda) A \quad (3)$$

と表現できる。等式(3)を等式(2)に代入すると、ロックイン増幅器55からの規格化した出力信号である $S_{LIS} (= V_{ac}/V_{dc})$ に対して、次の項、

$$S_{LIS} = \{ C \Delta R(\lambda)/R(\lambda) \} + \{ \alpha(\lambda_{pp}) I_{pp}(\lambda_{pp}) K(\lambda_{pp}) \} A \quad (4)$$

が生じる。

$\alpha(\lambda_{pp})$ 、 $I_{pp}(\lambda_{pp})$ 、 $K(\lambda_{pp})$ とAは全てプローブの波長に無関係であるので、等式(4)の第二項

は一定である。この第二項は $C \Delta R/R$ に比べて余り大きくないなら、この見掛け上の係数を引き算し、真の信号 $\Delta R/R$ を取り戻すことが簡単である。もし $C \Delta R/R \geq 0.01 (\propto I_{pp} K A)$ なら、この引き算は容易に行えることが見出されている。見掛け上の信号を引き算することは、光反射率装置を正しく操作するのに大切である。

電算機の機能

公知のタイプのもであり、充分な記憶部を保有する電算機70は、次の機能をもたらしようにプログラムされる。プログラムの作成には通常のプログラム作成技術含まれているので、当業者に周知のように、これに関する詳細な説明は簡単のため省略する。

電算機70に使用するソフトウェアは、三つの一般的な機能に分割できる。これ等の機能は(A) 制御とデータ収集、(B) 光反射率スペクトルのライン形状を合わせることを含めたデータ解析、及び(C) データ解析で得られた関連パラメータ

と理論モデルとの比較に分類される。

A. 制御とデータ収集の機能部

制御とデータ収集の機能部は、次の機能のために使用される。

(1) この機能部はステップモータ53を制御する。このモータは、規格化する目的で V_{λ} を一定値に維持するため、可変ニュートラル密度フィルター58を可変する。このことは、この出願に先行して出願した、発明の名称が「改良された電算機制御を用いて光反射法によって材料の特性を決定する方法とその装置」の特許出願に記載してあるように有利に行われる。この出願の要旨はこの明細書の中で参照される。

(2) この機能部はステップモータ52を制御する。このモータはプローブモノクロメータ51を駆動する。こうして、所定の実験に対して波長 λ の範囲が電算機70によって設定できる。同様に、電算機70は多重走査のためにステップモータ52を制御でき、予め指定したSN比にする。

ある。この信号は、電算機70によって解析され、ロックイン増幅器55の入力端に現れるポンプビームの絶対位相を決定する。こうして、電算機はロックイン増幅器55を光学ポンプに対して正しい位相に設定し、しかもこのロックイン増幅器55の零点設定を変えて、見掛け上の信号を排除する。見掛け上の信号が大きい場合、上記の処理は幾つか異なったプローブビームの波長で繰り返される。

B. データ解析とライン形状の合わせ

この機能部は、以下の機能を実行する。

(1) この機能部は、機能部AとCの間を仲介する。

(2) この機能部は、電算機の画面上に利用者が慣れた方法でデータ（光の反射率のスペクトル）を表示する。例えば、光子の波長を光のエネルギーに変換する。データのスペクトルの異なる領域では、拡大した状態にして表示できる。

(3) この機能部は、高速フーリエ変換、SN比

(3) 電算機70はロックイン増幅器55からの信号の同相成分と異相成分を記録する。

(4) 電算機は切出（チョッパ）周波数 Ω を制御する。同相信号の Ω 依存性を測定するとき、この電算機70は Ω を制御する。この場合、電子系（検出器、初段増幅器、ロックイン増幅器）の増幅度は Ω と共に変化する。電算機のソフトウェアはこのために自動的に修正される。

(5) 電算機は第二モノクロメータ63bを駆動してポンプビームの波長 λ を可変するステップモータ92を制御する。

(6) 所定の実験の電算機制御は、真の光反射率の信号 $C(\Delta R/R)$ から見掛け上の信号 $\propto I_{\lambda}$ 、 KA を引き算するのに重要な作用を行う。この制御は次のように行われる。電算機70がステップモータ52で設定したある与えられたプローブビーム波長（ λ ）の場合、この電算機は可変ニュートラル密度フィルター58を最大密度にセットする。従って、等式(3)と(4)の定数 C （及び I_{λ} ）が零になる。この場合、 $S_{\text{true}}(\lambda) = \alpha I_{\lambda} KA$

を改善する濾波と整形処理、及び信号を解析するため微分・積分を含むデータ変換を行う。

(4) この機能部は、データにライン形状を合わせることができ、スペクトル特徴の光子エネルギー、スペクトル特徴のライン幅、振幅及び位相のような重要なパラメータを引き出すことができる。これは全プログラムの重要な機能である。

(5) この機能部は、同相の光反射率の信号が周波数（ Ω ）の切り出しに依存性に適合する。この適合は、トラップ時間に関する情報を得るのに使用できる。

(6) この機能部は、スペクトルの同相成分と異相成分のベクトル解析を行い、深さの異なる試料の領域からの信号を識別する。

(7) Franz-Kaldysh 振動が観察される場合、この機能部はFranz-Kaldysh 振動のピーク位置を評価する。この位置は電界と往々キャリアの濃度を決定するのに使用される。

C. データの関連パラメータと理論モデルとの比較

ソフトウェア部Bでは、エネルギーギャップの位置、Franz-Keldysh 振動のピーク位置等のような実験情報の種々の断片が得られる。このデータを有効にするため、このデータを種々のモデルと比較し、半導体又は半導体組織に関する有効な情報を与える必要がある。

(1) 薄膜又はバルクの合金材料では、エネルギーレベルの位置を用いて、合金の成分を評価できる。例えば、 $Ga_{1-x}Al_xAs$ でのAlの成分(x)が定まる。

(2) 薄膜又はバルク単成分又は二元半導体(GaAs, Si等)では、エネルギーギャップの位置を用いて、材料の温度を測定する。

(3) ライン幅を評価して、結晶の品質に関する情報を得ることができる。

(4) 歪みはピークのずれとその割れから判定できる。

(5) Franz-Keldysh 振動が観察されると、ピークの位置を用いて組込電界を評価し、ある場合キ

ャリヤの濃度を評価できる。

(6) 同相成分の Ω と温度Tに対する依存性から、トラップ状態の活性化エネルギーを評価することができる。

(7) 超格子、量子井戸及び多重量子井戸のような半

的に定めたエネルギーギャップと比較して、量子井戸と障害物の幅、障害物の高さ、及び格子不整のある系(InGaAs)の場合、生じる歪みを評価できる。

この状況のプログラムと上のソフトウェア部B-4で議論されたラインの形状を合わせることに強い相関がある。半導体の微細組織では、スペクトルはしばしば非常に複雑であるため、主要なピークしかソフトウェア部B-4のライン形状の合わせによって合わせることができない。次いで、この初期情報をソフトウェア部C-7の理論モデルに供給し、他の微細な特徴を見出す個所を決定する。次いで、この情報をソフトウェア部B-4に導入して、小さなスペクトルのライン形状

の合わせが完了する。

A. MBEとMOCVDに対する成長条件のその場監視

GaAs 及び $Ga_{0.99}As_{0.01}$ に関する光反射法を600℃までの温度で行うことができる。これ等の温度はMBEとMOCVDに対する成長条件に相当する。光の反射率を利用して、GaAs 基板の温度を、数千オングストロームのみの深さ内で、つまり成長した表面近傍で約±10℃で無接触に測定できる。 $Ga_{1-x}Al_xAs$ のエピタキシャル層の成長をその場監視することも行える。両方の場合で、形態的な走査を行い、一様性を評価できる。半導体のエネルギー・バンドギャップは温度、合金組成($Ga_{1-x}Al_xAs$ のような合金半導体の場合)、応力等のような種々のパラメータの関数である。エネルギー・バンドギャップの位置を正確に測定することによって、上記の量に関する情報を得ることができる。

B. 半導体ヘテロ組織界面での電界分布

光反射法は半導体のヘテロ組織界面での電界分布とトラップ回数を研究するのに、無接触法として使用できる。電界分布とトラップ回数を界面の電荷に結び付けることができる。これ等の電荷の特性を知ることは、デバイスの応用に非常に重要である。

それ故、光反射のシャープで微分的な様相に利用できるだけでなく、新しい二つの重要な様相にも使用できる。即ち、異なったポンプ波長(λ_p)と光反射信号の同相成分の変調周波数(Ω_m)依存性を使用することである。このことは、例えばMBEで成長させた $Ga_{0.99}As_{0.01}/GaAs/GaAs$ (エピタキシャル成長層/バッファ/基板)のヘテロ組織からの300Kでの光反射率スペクトルを λ 。(8200Å-4200Å)と Ω 。(20Hz-4000Hz)の関数として研究することを可能にしている。上記のバッファは半絶縁GaAsである。シャープなスペクトルは、組織の異なった部分、即ちエピタキシャル層、バッファ、基板のバンド・ギャップを直

接観察することを可能する。

異なった λ_p を用いると、キャリアが組織の種々の領域で光励起され、これ等の独立部分を選択的に変調できる。

光反射率の同相成分の Ω 。依存性を測定すると、種々の界面でのトラップ回数を測定できる。この同相部分は以下の理由で重要である。これまでは、トラップ回数は光反射率の大きさの Ω 。依存性から推定されていた。この信号の大きさは同相信号の二乗と異相信号の二乗の和である。しかしながら、この量は異なった時定数のトラップから寄与があると、重畳の原理に従わない。従って、この方法は単一トラップ状態にのみ厳密に適合する。多重トラップ状態には、異なったトラップ時間の寄与の重畳を使用するため、同相成分の Ω 。依存性を(ポンプビームに対して)評価する必要がある。

ポンプ切り出し周波数 Ω_p の電算機制御と信号の同相成分(異相成分も)の積算は、この種の実験の成功に極度に重要である。

態の低密度およびこの基板とバッファの間の状態密度が比較的高い証拠である。

以下は、この発明を用いた典型的な実験の手続きである。

使用したヘテロ組織は半絶縁(SI)〈100〉LEC GaAs 基板の上の800 nmのGaAs バッファ上で成長した200 nmのGa_{0.95}Al_{0.05}As エピタキシャル層で構成されている。全ての測定は300 Kで行った。 λ_p の光源は、1/4メートルのモノクロメータによってフィルターをかけたキセノンアークとHe-Neレーザーである。ポンプビームの強度は、約2 mWである。全ての場合、観察したライン波形は低領域の変調を示す I_p に無関係である。二相ロックイン増幅器を使用して、ポンプビームの位相に対して光反射信号の同相および異相成分を記録する。He-Neレーザーの633 nmのラインを使用する測定は、機械的なチョッパーの代わりに音響光学変調器を用いて、100 kHzまで行われた。

第2図の点線は、 $\lambda_p = 820$ nm で $\Omega_p = 200$

ある組織の種々の成分の直接のバンドギャップをGaAlAs エピタキシャル層(領域A)；GaAs バッファ(領域B)及びGaAs 基板(領域C)に対してそれぞれ $E_o(A)$ 、 $E_o(B)$ および $E_o(C)$ と記す。領域BとCの何れにも通過しない420 nmのポンプ輻射に対して、 $E_o(A)$ と $E_o(B)$ を観測できないが、 $E_o(C)$ は観測できた。全ての3ピークを $\lambda_p = 620$ nm から観察することができる(第3図)。この波長は $E_o(A)$ より大きいエネルギーに相当し、領域Bを通過するが、領域Cを貫通しない。ポンプ光子エネルギー(1.15 eV)が、 $E_o(A)$ より充分以下であるとき、光励起された電子・空孔対がGaAs バッファと基板領域の何れでも形成される。この場合、スペクトルは主に $E_o(B)$ からの僅かな寄与と共に $E_o(C)$ を示す(第3図)。更に、 $E_o(A)$ と $E_o(C)$ は Ω_p に関して異なった変化を有する。 $E_o(B)$ の依存性は領域Cからの寄与と共に、主に領域Aの変調機構に関連している。これ等の結果は、GaAs バッファとGaAlAs エピタキシャル層の間の界面状

E_o の実験的な光反射スペクトルである。 λ_p のこの値に対して、GaAlAs は透明で、GaAs 中の侵入深さ(d_o)は830 nmである。試料のA、BとCの領域と λ_p の吸収の領域(垂直破線)の構造は、この図の下の部分に模式的に示してある。実線はガウス・ライン波形関数の第一微分係数に対する最小二乗近似である。このような関数形は室温での励起子のような束縛状態に対して適切である。

第2図のスペクトルは、GaAlAsの直接のバンドギャップの近くの構造を示すが、GaAlAsのギャップの領域では信号が観察されない。ライン波形の近似は、 $E_o(C)$ と $E_o(B)$ として記載する二つの振動があり、後者が前者の約18%に過ぎないことを示している。エネルギーとその広がりパラメータは、 $E_o(C)$ と $E_o(B)$ に対してそれぞれ1.413 eV, 11 meV および1.420 eV, 4 meVである。形態 $E_o(C)$ と $E_o(B)$ はGaAs 基板とバッファにそれぞれ起因している。後者のピークのライン幅が狭いのは、恐らくバルクGaAsに

対してMBEで成長させた材料の品質が良いことに由来している。

第3図の点線は、 $\lambda_p = 620 \text{ nm}$ で $\Omega_p = 200 \text{ Hz}$ の実験的な光反射スペクトルである。この場合、 $d_0(\text{GaAlAs}) = 420 \text{ nm}$ と $d_0(\text{GaAs}) = 240 \text{ nm}$ である。従って、垂直破線で模式的に示すように、電子・空孔対は領域AとB中に形成されるが、領域Cでは形成されない。実線は、再びガウス波形の第一微分係数の最小二乗近似である。約1/3の比を有する $E_0(C)$ と $E_0(B)$ に加えて、 $E_0(A)$ も 1.662 eV のエネルギーに約 8 meV のライン幅を有することが認められる。 $E_0(A)$ の位置によって、Alの成分を決定できる。

$\lambda_p = 420 \text{ nm}$ で $\Omega_p = 200 \text{ Hz}$ のデータは、第4図中で点線によって示してある。このポンプ波長に対して $d_0(\text{GaAlAs}) = 30 \text{ nm}$ であるので、光励起されたキャリアは領域Aでのみ形成され、領域B又はCでは形成されない。実線もガウスライン計上の第一微分係数に対する最小二乗近似である。これ等の条件下では、二つのピーク、 E_0

(B) と $E_0(A)$ のみが観察される。 1.42 eV のライン波形での $E_0(C)$ に対する証拠は実質上なかった。

種々の光反射構造の同相成分の振幅の変調周波数 (Ω_p) 依存性は、第5図に示してある。 E_0

(A) と $E_0(B)$ の変化は、He-Neレーザーからの 633 nm のポンプ輻射とチョッパーとしての音響光学変調器によって形成されたスペクトルから評価される。 $\lambda_p = 633 \text{ nm}$ のスペクトルは、第3図のスペクトルに非常に似ている。 1.42 eV の回りの様子は、 $E_0(C)$ より三倍大きい $E_0(B)$ からの寄与を示すので、 $E_0(B)$ の Ω_p 依存性はこの構造の高いエネルギー側 ($\sim 1.43 \text{ eV}$) から評価されている。

$\Delta R/R$ の Ω_p 依存性は以下の考えを基礎にして計算される。切り出した(変調した)ポンプ輻射は矩形波光源と見做せる。光が試料に入射すると、電子・空孔対が形成される。これ等の電荷は自由にトラップを満たす、そして電界強度を変える。恐らくこれ等の過剰キャリアは使用する変調

の最短特性時間より大幅に早い応答時間で本来の電界を変える。光が遮断されると、トラップ密度と電界強度は特性時間 τ_i と共に回復する。切り出し周波数 Ω_p に対して、光反射強度の同相成分のフーリエ変換、 $[\Delta R(\Omega_p)/R]_{i=1,2,\dots}$ は、

$$[\Delta R(\Omega_p)/R]_{i=1,2,\dots} =$$

$$\sum_{i=1}^n [\Delta R(0)/R]_i f(\Omega_p, \tau_i) \quad (5a)$$

$$f(\Omega_p, \tau_i) = (1 + 2\pi^2(\Omega_p \tau_i)^2)^{-1/2}$$

$$[1 - \exp(-1/2 \Omega_p \tau_i)] / [1 + 4\pi^2(\Omega_p \tau_i)^2] \quad (5b)$$

で与えられる。ここで、 τ_i は i 番目のトラップ状態の特性時定数であり、 $[\Delta R(0)/R]_i$ は $\Omega_p \tau_i \ll 1$ の極限で i 番目のトラップ状態の変調によって発生する光反射信号である。異なったトラップ回数を有する状態の寄与の重ね合わせ原理を使用するため、 $\Delta R(\Omega_p)/R$ の同相成分を考慮する必要がある。振幅は考慮しなくてもよいことを示すことができる。

第5図の実線は、実験データに対する等式(5aと5b)の最小二乗近似である。 $E_0(A)$ の様子はただ一つの時定数、 $\tau_1(A) = 0.047 \text{ ns}$ からの寄与を含む。この時定数は非常に早いので、機械的なチョッパーの制限のために、 $4,000 \text{ Hz}$ までの変調周波数 Ω_p に対して観察できない。 $E_0(C)$ の様子も $\tau_1(C) = 0.33 \text{ ns}$ の時定数でのみ定まる。しかし、 $E_0(B)$ は $\tau_1(B) = 0.045 \text{ ns}$ と $\tau_2(B) = 0.37 \text{ ns}$ を有する二つのトラップ機構からの寄与を含む。二つの寄与の比は $[\Delta R(0)/R]_1 / [\Delta R(0)/R]_2 = 1.6$ である。従って、GaAs バッファ層の変調に対する主機構は遅い状態からの寄与と共に GaAlAs に付随する状態 ($\tau_1(B) = 0.045 \text{ ns}$) からの寄与による。後者の寄与は $E_0(C)$ の変調機構であり、恐らくバッファと基板間の界面に起因する。

光反射法は、このように、ドーピングしていない GaAlAs/GaAs/GaAs ヘテロ構造の特性を評価するのに利用できる。ポンプビームの波長とその変調周波数を可変して、成分層、その品質および種々

の界面の特性を特定できる。音響光学変調器を用いて、100 kHzまでの測定ができる。このことは、結局、約 40 μ s のような早い時定数のトラップ状態に関する情報を得ることを可能にする。ドーブしていない又は伝導度の低い構造に適用されるようなこの発明による技術は、このように、通常伝導度の高い構造に適用される電気変調技術、例えば電子反射、DLTS等に対して相補するものである。

この発明によるただ一つの具体例を示し説明したが、同じことは来れに限定されるのでなく、当業者に知られている種々の変更と修正が考えられる。それ故、ここに図示し説明した詳細に限定することを希望せず、特許請求の範囲に指定されるそのようなどんな変更や修正もこの発明の範囲内にある。

4. 図面の簡単な説明

第1図、装置の精度と汎用性を拡大するため電算機支援された音響光学ポンプビーム変調を組みにして光反射を利用するこの発明による装置の模

式ブロック図。

第2図、波長 820 nm のポンプビームに対して GaAlAs/GaAs/GaAs 構造の光子エネルギーに対する光反射信号射を示すグラフ。

第3図、波長 620 nm のポンプビームに対して GaAlAs/GaAs/GaAs 構造の光子エネルギーに対する光反射信号射を示すグラフ。

第4図、波長 420 nm のポンプビームに対して GaAlAs/GaAs/GaAs 構造の光子エネルギーに対する光反射信号射を示すグラフ。

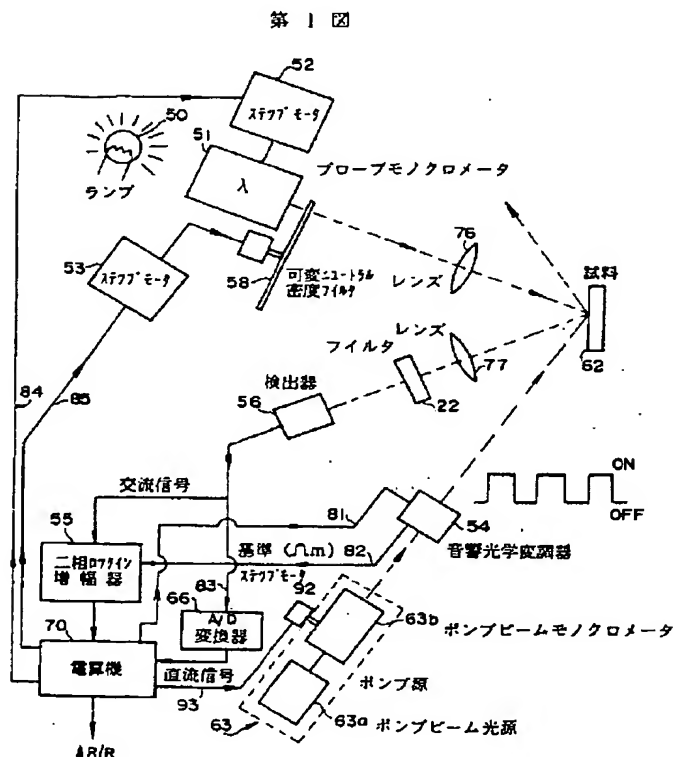
第5図、ポンプビーム変調周波数 Ω に対する光反射信号を示すグラフ。

図中参照符号：

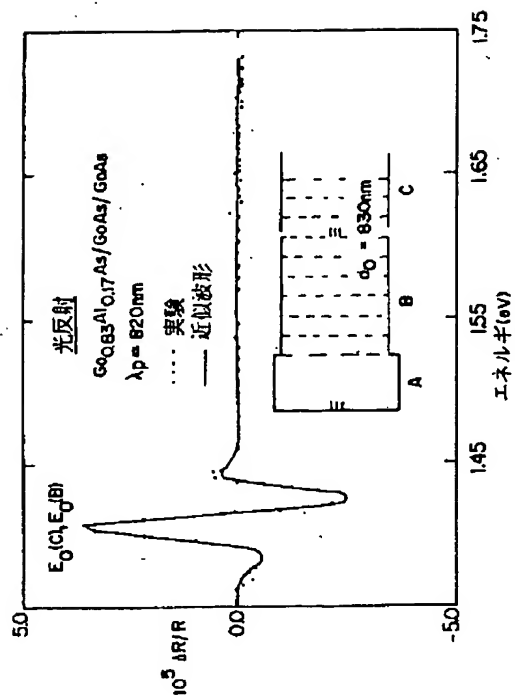
- 50・・・光源、
- 51・・・モノクロメータ、
- 62・・・試料、
- 63・・・他の二次光源、
- 54・・・チョッパー、
- 56・・・検出器、
- 16・・・サーボ系、

- 58・・・可変ニュートラル密度フィルタ、
- 55・・・ロックイン増幅器、
- 66・・・A/D変換器、
- 70・・・電算機、
- 76, 77・・・レンズ。

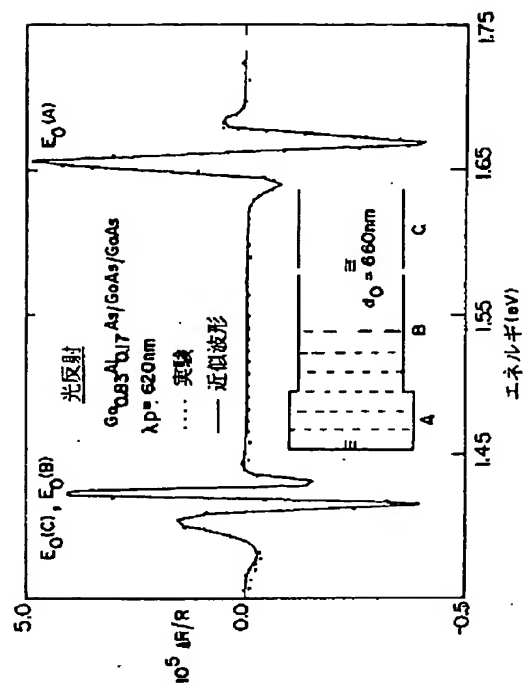
代理人 江崎光好
代理人 江崎光史



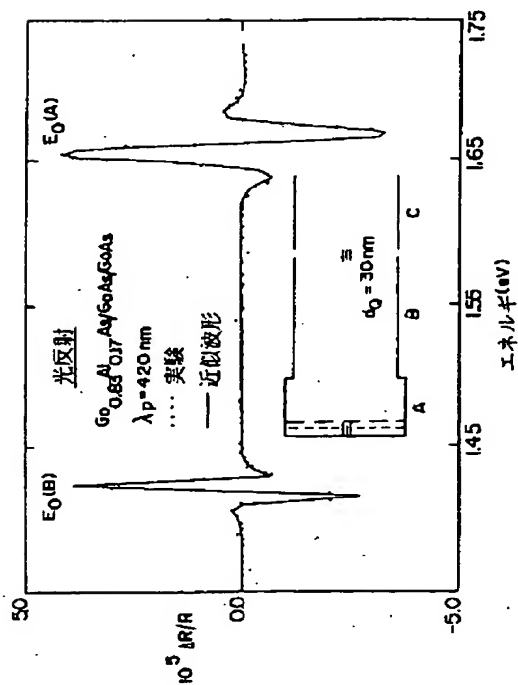
第 2 図



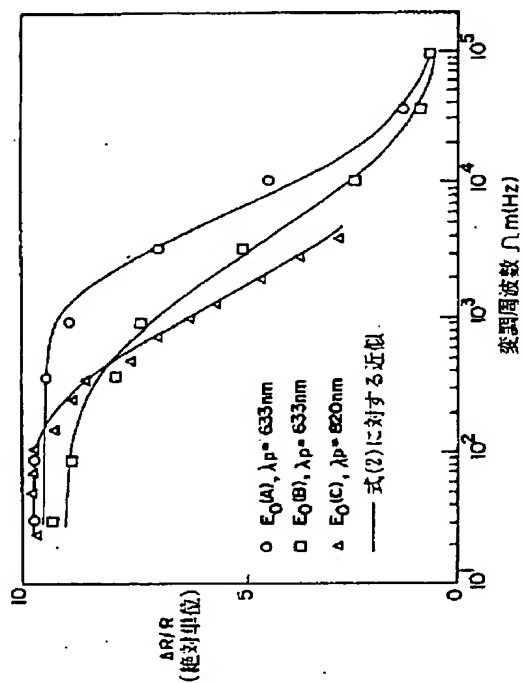
第 3 図



第 4 図



第 5 図



第1頁の続き

②発明者

ホジ・エン・シェン

アメリカ合衆国、ニュー・ジャージー州、イートン タウ
ン、カウンティ・クラブ・ロード、7 アパートメント、
29